

フレーム重畳型動画電子透かしの検出性能評価に関する一考察

Consideration on evaluation of detectability for frame-based video watermarking

山本 奏† 中村 高雄† 高嶋 洋一† 片山 淳† 北原 亮† 宮武 隆†

Susumu Yamamoto Takao Nakamura Youichi Takashima Atsushi Katayama Ryo Kitahara Takashi Miyatake

1. はじめに

動画像に対する電子透かし技術として、様々な方式が提案されてきた [1]。これまで電子透かし方式の優劣を比較するには、各方式をブラックボックスと見て、例えば符号化や変形等のノイズ付加時の検出可否を測ることにより評価されてきた [2]。しかし、二つの方式の優劣を、実際の埋め込み・検出を行わずに共通の基準の下で理論的に比較することができなかった。

本稿では、フレーム画像に透かしパターンを重畳する相関利用型の動画電子透かしにおいて、検出の false positive rate の小ささを表す指標を用い、埋め込み多重度による検出性能の違いを評価する。さらに、電子透かしの埋め込み時にこの評価指標を用いることにより、原動画像の持つ特徴に応じて、目標性能を満たす最適な埋め込み方式を選択できる例を示す。

2. フレーム重畳型動画電子透かしモデル

本稿では、以下の電子透かし埋め込みと検出のモデルを評価の対象とする。

2.1 電子透かし埋め込みモデル

文献 [3] で示された方法 (E_SIMPLE.8) を修正し動画像に適用した下記の方法を用い、電子透かしの埋め込みを行う。

1. 透かし情報を k 個のシンボル S_1, S_2, \dots, S_k に分割する。
2. 各シンボル S_j に対し、シンボル値とシンボル位置 j 毎に異なる透かし信号系列として、平均 0、分散 1 の分布を持つ十分な長さ l の各々独立な擬似乱数列 \vec{X}_j を生成する。
3. 原動画像の各フレーム i に対し、 n ($n \leq k$) 個のシンボル $S_{y_{i1}}, S_{y_{i2}}, \dots, S_{y_{in}}$ を選択し[†]、対応する透かし信号系列を多重化し、次式を満たすように原動画像に重畳する。 n を埋め込み多重度と呼ぶことにする。

$$\vec{W}_i = \alpha \vec{\xi}_i + \vec{N}_i \quad (1)$$

ただし \vec{N}_i は原動画像の透かし埋め込み対象となる成分値の列、 \vec{W}_i は透かし埋め込み後の成分値の列、 α は透かしの埋め込み強度である。 $\vec{\xi}_i$ は、 $\xi_i' = \sum_{j=1}^n \vec{X}_{y_{ij}}$ 、 $\xi_i = \xi_i' / \sigma_{\xi_i'}$ ($\sigma_{\xi_i'}$ は ξ_i' の要素の標準偏差) のように求める。これにより、 \vec{W}_i と画素値が線形関係を持つ電子透かし方式であれば、PSNR 値で表される画質を α と対応付けることができる。

2.2 電子透かし検出モデル

透かし検出対象の動画像から、後述する方法によって得た検出対象系列 \vec{W} に、電子透かしとして透かし信号系列 \vec{X} が

[†]日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所, NTT Cyber Space Laboratories

[‡] $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}$ は、フレーム i に埋め込まれるシンボルの番号を表し、 $1 \sim k$ の数の中から n 個を取り出して昇順に並べた列である

埋め込まれているかどうかを、次式の透かし検出評価値 ρ を用いて評価する。

$$\rho = \frac{\vec{W}' \cdot \vec{X}}{\sqrt{l}} \quad (2)$$

ただし、 $\vec{W}' = (\vec{W} - m_w \vec{1}) / \sigma_w$ であり、 m_w, σ_w はそれぞれ \vec{W} の要素の平均および標準偏差である。

透かしが埋め込まれていない場合、 l が十分大きければ式 (2) の ρ は平均 0、分散 1 の正規分布となる。従って、許容できる false positive rate を用いて ρ の閾値を決定することで、透かし検出の信頼性を評価することが出来る [4][5]。

同一の原動画像において透かし埋め込み後の画質を等しくしたときの検出信頼度は、同時にロバスト性のマージンも表すと考えられ、検出評価値 ρ を電子透かし方式の検出性能をあらわす指標として用いることにする。

3. 埋め込み多重度に応じた検出性能の比較

2章で述べた電子透かしモデルに従い、検出時に検出対象動画像から利用するフレームが異なる次の 2 つの検出方法について検出性能の評価を試みた。

方法 1 目的のシンボルが含まれているフレーム画像を選択しそれらを加算重畳した画像から検出を行う

方法 2 全てのフレーム画像を加算重畳した画像から検出を行う

電子透かしの検出時に、フレームの同期が取れる場合、すなわち、どのフレーム画像にどの透かし信号が埋め込まれているかが判明している場合には、方法 1 による検出が可能である。一方、フレームの同期が取れない場合には方法 2 で検出しなければならない。後者の例としては、例えばカメラキャプチャ等によるフレーム位置ずれや、攻撃や通信エラーによるフレーム落ちが生じた場合などがある。

以下では、計算を容易にするため k フレームの検出対象動画像から透かし信号 \vec{X}_i を検出する場合を例に、上記の各方式の検出性能を比較する。

3.1 各方式の検出性能

y_{ij} が偏りなく選ばれていれば、 k フレーム中 \vec{X}_i の含まれるフレーム数は n となる。方式 1 で、これら n 枚のフレームから得られる検出対象成分系列を $\vec{W}_1, \vec{W}_2, \dots, \vec{W}_n$ とすると、 $\vec{W} = \sum_{i=1}^n \vec{W}_i$ となる。一方方式 2 では、 k フレームから得られる検出対象成分系列を $\vec{W}_1, \vec{W}_2, \dots, \vec{W}_k$ とすると、 $\vec{W} = \sum_{i=1}^k \vec{W}_i$ となる。これらを式 (2) に代入し、 \vec{N}_i, \vec{X}_j の動くときの ρ の平均値 $E[\rho]$ を求めると、

$$\text{方法 1: } E[\rho] = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{\left(1 + \frac{A}{n^2}\right) + \frac{B}{n\alpha^2}}} \quad (3)$$

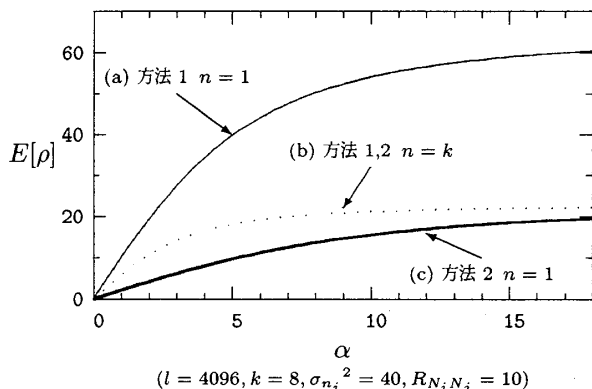


図 1: 埋め込み強度 α と検出評価値の期待値 $E[\rho]$ の関係

$$\text{方法 2: } E[\rho] = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{k + \frac{C}{n\alpha^2}}} \quad (4)$$

となる。ここで、 $A = V \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^n \vec{X}_{vij} \right]$ 、 $B = \sum_{i=1}^n \sigma_{n_i}^2 + \sum_{\substack{i \neq j \\ i, j \leq n}} R_{N_i N_j}$ 、 $C = \sum_{i=1}^k \sigma_{n_i}^2 + \sum_{\substack{i \neq j \\ i, j \leq k}} R_{N_i N_j}$ である。ただし、全ての i, j について、 \vec{N}_i と \vec{X}_j が独立であるとし、 m_{n_i} 、 $\sigma_{n_i}^2$ は \vec{N}_i の各要素の平均および分散、 $R_{N_i N_j}$ は、 \vec{N}_i 、 \vec{N}_j の各要素についてみたときの共分散 $R_{N_i N_j} = \frac{1}{l} (\vec{N}_i - m_{n_i} \vec{I}) \cdot (\vec{N}_j - m_{n_j} \vec{I})$ である。

3.2 埋め込み強度と検出性能値の関係

式 (3) および式 (4) から、埋め込み強度 α と検出評価値の期待値 $E[\rho]$ の関係をグラフにすると、図 1 のようになる。ここで、図 1 には $n=1$ と $n=k$ の場合について示した。ただし、 $n=k$ の場合二つの方法は等しい検出評価値となる。

4. 考察

3章で得られた各方式の検出性能について以下に考察する。

4.1 シンボル多重度と検出性能の関係

式 (3) において、 n 枚のフレームに対して同一のシンボルが複数回埋め込まれる場合があることを考えると、 $A \sim n^3$ となる。結果、 $E[\rho]$ は n が大きいほど小さくなり、図 1 で曲線 (a) は n の値が大きくなるにつれて曲線 (b) に近づく。具体的に $n=1$ と $n=k$ とでは、 $\alpha \rightarrow \infty$ のとき $1/\sqrt{k}$ 倍の差がある。

また、式 (4) において n が大きくなれば分母第 2 項は小さくなる。結果、 $E[\rho]$ は n が大きいほど大きくなり、図 1 で曲線 (c) は n の値が大きくなるにつれて曲線 (b) に近づく。具体的に $n=1$ と $n=k$ とでは、 $\alpha \rightarrow 0$ のとき \sqrt{k} 倍の差がある。

4.2 フレーム同期と検出性能の関係

方法 1 および方法 2 の検出性能の違いは、検出時の同期精度が検出性能を左右することを理論的に示しており、多重度が小さいときに差が広がり、多重度が大きくなると差が縮まる。具体的には、 $n=1$ でおおよそ \sqrt{k} 倍の差となる。これは、 $n=1$ のとき、同期が取れなければ、検出対象の透かし信号の含まれないフレーム画像の重畳により、原画像成分と検出

対象以外の透かし信号成分が相対的に k 倍のエネルギーを持つことで説明できる。

また、同期を取れる精度に応じて、検出性能が二つの方法の中間値をとるとすると、電子透かしの検出時に期待できる同期精度に応じて、検出性能を最大とする多重度を埋め込み時に判断できると考えられる。

4.3 原動画像評価による埋め込み方式制御

検出性能と画質劣化の目標値を定めることで、例えば次のような方法で、最適な多重度 n を制御することが可能となる。

今、電子透かしの性能目標として、目標とする検出評価値 ρ_0 および画質 (PSNR 値) q_0 が与えられたとき、次の条件を満たす電子透かし埋め込み方式を考える。

条件 1 画質 q_0 を保証し、同期が取れない状況において検出評価値 ρ_0 を越える検出性能をもつ方式の中で、同期が取れた場合の検出評価値が最大となるもの

条件 2 画質 q_0 を保証し、同期が取れた状況において検出評価値 ρ_0 を越える検出性能をもつ方式の中で、同期が取れない場合の検出評価値が最大となるもの

原動画像の $\sigma_{n_i}^2$ 、 $R_{N_i N_j}$ を評価することで、図 1 のグラフを算出できる。与えられた目標画質 q_0 に対応する埋め込み強度 α_0 を用いると、4.1 に述べた多重度と検出性能の関係から、条件 1 を満たす n の値は、 (α_0, ρ_0) を通る方法 2 の曲線に対応する n の値であり、条件 2 を満たす n の値は、 (α_0, ρ_0) を通る方法 1 の曲線に対応する n の値となる。

このように電子透かし方式の検出性能比較が可能となれば、電子透かしの埋め込み時に原動画像の特徴を分析し、目標性能に合わせて電子透かし埋め込み方式を制御できる。

5. まとめ

検出の false positive rate に基づいた検出評価値を用い、埋め込み多重度の異なる動画電子透かしの検出性能を分析した。

分析の結果、透かし埋め込み対象成分の分散、共分散などの原動画像の特徴と、埋め込み強度、多重度などの透かし埋め込みパラメータを用い、理論的検出性能を表すことができた。また、分析結果を用いることで、検出時に期待できる同期精度や与えられた性能目標に応じた、最適な埋め込み方式を決定できる可能性を示した。

本稿では画質の基準を PSNR 値で統一することで検出性能を比較したが、多重度が異なれば共通の PSNR 値であっても主観的な画質は異なることが考えられる。今後、多重度を変化させた場合の画質主観評価を含めた分析を進める。

参考文献

- [1] 酒澤茂之, “透かし技術とその周辺 II 動画画像電子透かし”, 画像電子学会誌, Vol.31, No.3, pp.421-425 (2002).
- [2] M. Kutter, et al. “A Fair Benchmark for Image Watermarking Systems,” *Security and Watermarking of Multimedia Contents*, SPIE-3657, pp.226-239 (1999).
- [3] I. J. Cox, et al. “Digital Watermarking,” *Academic Press*, pp.95-97 (2002).
- [4] T. Nakamura, et al. “Improved Digital Watermark Robustness against Translation and/or Cropping of an Image Area,” *IEICE Trans. Fund.*, Vol. E83-A, No.1, pp.68-76 (2000).
- [5] 中村高雄 他, “カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-D-II, No.12, pp.2145-2155 (2004).